6 月 June
2020, 63(6): 759 – 768

昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA

http://www.insect.org.cn
doi: 10.16380/j.kcxb.2020.06.012

二化螟的多次交配及其对雌蛾产卵量的影响

冯 波[1], 刘天伟[2], 陆明红[3], 钟 玲[4], 郭 荣[3], 刘万才[3], 郭前爽[2], 杜永均[2,*]

(1. 温州医科大学健康与环境生态研究所, 浙江温州 325035; 2. 浙江大学农药与环境毒理研究所, 杭州 310058; 3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; 4. 江西省植保植检局, 南昌 330096)

摘要:【目的】利用性诱防控和监测水稻二化螟 *Chilo suppressalis* 的有效性在田间已经得到认可。但雄蛾具有多次交配能力,致使性诱防治二化螟的应用策略一直存在争论。本研究的目的是探索二化螟雄蛾的多次交配及其对雌蛾繁殖力的影响,认识性诱防控害虫的机理。【方法】利用行为学方法调查了雌雄蛾以不同比例配对(1∶1, 4∶1和 10∶10)时雄蛾的交配次数和交配持续时间,并结合解剖学方法,观察分析了二化螟雄蛾的交配次数对精巢、交配囊和精包大小以及雌蛾产卵量的影响。【结果】二化螟雌雄蛾按 1∶1配对时,交配雄蛾和多次交配雄蛾的比例分别为 74.0% 和 36.0%,平均交配 1.7 次,首次交配主要发生在 0 – 1 日龄,绝大部分具有多次交配能力的雄蛾的首次交配发生在 0 – 1 日龄。雌雄蛾按 4∶1配对时,交配雄蛾和多次交配雄蛾的比例分别为 69.4% 和 51.3%,平均交配 2.1 次,显著高于按 1∶1配对。雌雄蛾按 10∶10 配对时,交配雄蛾和多次交配雄蛾的比例分别为 65.5% 和 37.8%,平均交配 1.9 次。雄蛾第 3 次交配的持续时间显著长于第 1 和 2 次交配,但是交配 1 – 3 次雄蛾的精巢体积无显著差异。与不同交配次数雄蛾进行交配的雌蛾交配囊和精包体积无显著差异,雌蛾产卵量也无显著差异。【结论】二化螟中仅有部分雄蛾能够多次交配,多次交配雄蛾的首次交配主要发生在 0 – 1 日龄,部分雄蛾一生都不会交配。研究结果为二化螟的性诱防治提供了理论依据。

关键词: 二化螟; 多次交配; 精巢; 交配囊; 精包; 产卵量; 交配持续时间

中图分类号: Q968 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2020)06-0759-10

Multiple mating of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and its effect on the oviposition of female moths

FENG Bo[1], LIU Tian-Wei[2], LU Ming-Hong[3], ZHONG Ling[4], GUO Rong[3], LIU Wan-Cai[3], GUO Qian-Shuang[2], DU Yong-Jun[2,*] (1. Institute of Health and Environmental Ecology, Wenzhou Medical University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 2. Institute of Pesticide and Environmental Toxicology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. National Extension and Service Center of Agricultural Technology, Beijing 100125, China; 4. Plant Protection and Quarantine Station of Jiangxi Province, Nanchang 330096, China)

Abstract:【Aim】The effectiveness of controlling and monitoring the striped rice stem borer, *Chilo suppressalis*, by pheromone trapping had been verified in the field. However, since the male moth can mate multiple times, the mass trapping control strategy of *C. suppressalis* has been in debate for decades. The purpose of this study is to explore the mating frequency of male moths of *C. suppressalis* and its effect on the fecundity of female moths, and to understand the mechanism of pest control by pheromone mass

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871956, 31700329); 浙江省重点研发计划(2018C02027)
作者简介: 冯波, 男, 1982 年生, 四川广安人, 博士, 副研究员, 研究方向为化学生态学和昆虫分类学, E-mail: fb@wmu.edu.cn
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yongjundu@zju.edu.cn
收稿日期 Received: 2019-11-04; 接受日期 Accepted: 2020-01-07

trapping.【Methods】The mating frequency and duration of mating of male moths of *C. suppressalis* paired in different female to male ratios (1∶1, 4∶1 and 10∶10) were investigated by behavioral methods. The effects of mating frequency on the size of testis, bursa copulatrix and spermatophore and the number of eggs laid by female moths were observed and analyzed by behavioural and anatomical methods.【Results】When the female and male moths were paired in the 1∶1 ratio, the proportions of male moths mating at least once and mating multiple times were 74.0% and 36.0%, respectively, and the average mating frequency of male moths was 1.7 times. The first mating was always found in the male at the 0 – 1-day-old. Most of the male moths mating multiple times were firstly mated at the 0 – 1-day-old. When the female and male moths were paired in the 4∶1 ratio, the proportions of male moths mating at least once and multiple times were 69.4% and 51.3%, respectively, and the average mating frequency was 2.1 times, which was significantly higher than that of male moths paired with females in the 1∶1 ratio. When the female and male moths were paired in the 10∶10 ratio, the proportions of male moths mating at least once and multiple times were 65.5% and 37.8%, respectively, and the average mating frequency was 1.9 times. The duration of the 3rd mating of males was significantly longer than that of the 1st and the 2nd mating, but there was no significant difference in the testicular volume among males mating once, twice and thrice. There was no significant difference in the volume of bursa copulatrix and spermatophore of female and in the number of eggs laid per female, which mated with males at different mating frequencies.【Conclusion】Only a portion of *C. suppressalis* male moths can mate multiple times and their first mating mainly occurred at the 0 – 1-day-old. A significant number of male moths do not mate in their life. Our results provide a theoretical basis for controlling *C. suppressalis* with pheromone trapping.

Key words: *Chilo suppressalis*; multiple mating; testis; bursa copulatrix; spermatophore; oviposition amount; mating duration

二化螟 *Chilo suppressalis* 是我国水稻的重要害虫,目前各地主要依赖化学农药防治。为了解决化学农药防治带来的环境污染和二化螟抗药性快速上升问题,基于性信息素的害虫群集诱杀技术已经在防治二化螟过程中发挥重要作用(左文等, 2008; 杜永均等, 2013)。性诱区的百株卵块数只有对照区的25.6% ~39.8%,卵孵化率下降25.5%,诱蛾量只有对照区的38.6%,部分地区的诱蛾量甚至下降84.5%,雌雄性比由对照区的1.1上升为诱捕区的3.9,雌虫交配率下降47.7% ~54.1%,百株枯心率、枯鞘率和白穗率较对照区分别要低77.9%,57.0%和44.3%(盛承发等, 2000; 苏建伟等, 2003; Jiao *et al*, 2005)。为了更好地理解二化螟的性信息素调控行为,很多学者对二化螟的交配行为进行了研究(焦晓国等, 2006; Quan *et al*., 2017),分析了日龄(Kanno and Sato, 1978)、温度和湿度(Kanno and Sato, 1979; 余棋等, 2017)、光强度(Kanno, 1981a)、光周期(Kanno, 1981b, 1984)、季节变化(Kanno, 1981c)、寄主差异(Cuong and Cohen, 2003; Ishiguro *et al*., 2006; Ueno *et al*., 2006; Huang *et al*., 2016)等对二化螟交配的影响,为二化螟的群集诱杀和嗅觉适应性提供了大量的理论依据。王银淑(1989)通过连续3年田间越冬代和连续4代室内饲养二化螟的观察,发现雄蛾多于雌蛾。室内利用稻苗饲养二化螟的雌雄比例甚至达到0.4∶1(雷妍圆等, 2009)。二化螟雄蛾具有多次交配能力,熊兴占等(1984)实验的10头雄蛾全部交配,最多交配6次,平均交配3.8次;焦晓国等(2006)实验的25头雄蛾中有22头交配,最多交配4次,平均交配2.7次。因此很多人认为,性诱剂并不能完全诱杀掉田间的二化螟雄蛾,只能诱杀部分雄蛾,则田间剩余雄蛾可以通过多次交配,与几倍于本身数量的雌蛾交配,完成大量产卵,从而质疑性信息素群集诱杀在二化螟防控中的作用,制约了性信息素群集诱杀技术用于防控具有多次交配习性害虫的大面积推广应用。为此,本研究调查了二化螟雄蛾的交配次数,比较了不同交配次数雌蛾的繁殖力,为明确性信息素群集诱杀在二化螟防治中的作用奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 试虫

2019年3月在浙江省金华市永康市采集含有

越冬代二化螟老熟幼虫的稻草并带回浙江大学。实验条件为温度 22 ±2℃，相对湿度 70% ±5%，光周期 13L∶11D。成虫羽化时，每天 18∶00 时开始，每小时收集一次新羽化的二化螟成虫，直至凌晨 1∶00 时。根据成虫体型、翅面特征和腹部末端特征鉴别二化螟雌雄。雌雄成虫分开饲养，喂以 10% 蜂蜜水，每天 18∶00 时饲喂一次。羽化当天收集的二化螟成虫标记为 0 日龄，其余日龄以此类推。

1.2　雌雄蛾按 1∶1配对时的交配次数

参考焦晓国等（2006）的方法，18∶00 时将 0 日龄未交配雄蛾与 1 日龄处女雌蛾按 1∶1放入 350 mL 交配杯中，盖上纱布。次日 18∶00 时解剖与之配对雌蛾的交配囊，检查精包有无，确定雌蛾交配状态。之后放入一头新的 1 日龄处女雌蛾，持续实验至第 6 天。根据配对 6 头雌蛾的交配情况，计算雄蛾的交配次数，同时分析雄蛾的交配动态。雌雄蛾饲养方法同 1.1 节。本实验共重复 5 次，每次 10 组。不同交配次数雄蛾的比例 =（不同交配次数雄蛾的数量/10）×100%，某个交配次数雄蛾中进行下一次交配的比例 = 下一次成功交配的雄蛾数量/当次配对的雄蛾数量 ×100%。

1.3　雌雄蛾按 4∶1配对时的交配次数

考虑到雌雄蛾交配时可能存在选择性，我们设计了如下方法：18∶00 时将 0 日龄未交配雌雄蛾按 4∶1放入 350 mL 交配杯中，3 d 后解剖 4 头雌蛾交配囊，检查精包有无，确定雌蛾交配状态，并计算雄蛾的交配次数。同时将雄蛾与 4 头新的 0 日龄处女雌蛾再次配对，3 d 后，解剖 4 头雌蛾交配囊，检查精包有无，确定雌蛾交配状态。最后根据 8 头配对雌蛾的交配状况计算雄蛾的交配次数。雌雄蛾饲养方法同 1.1 节。本实验共重复 4 次，每次 20 组。

1.4　雌雄蛾按 10∶10 配对时的交配次数

18∶00 时将 1 日龄未交配雌雄蛾按 10∶10 放入交配笼（30 cm ×30 cm ×30 cm）中，每日 19∶00 时开始，利用微弱红光，每隔 20 min 观察一次雌雄蛾的交配情况。当观察到交配，用 50 mL 离心管将正在交配的成虫移出，记录交配时间（起始时间、结束时间）。次日 18∶00 时将交配过 1 次的存活雄蛾与 1 日龄处女雌蛾按照 10∶10 放入交配笼（30 cm ×30 cm ×30 cm）中，从 19∶00 时开始，按照上述方法观察、移出交配雌雄蛾并记录交配时间。次日 18∶00 时将交配过 2 次的存活雄蛾与 1 日龄处女雌蛾按照 10∶10 放入交配笼（30 cm ×30 cm ×30 cm）中，从 19∶00时开始，按照上述方法观察、移出交配雌雄蛾并记录交配时间。次日 18∶00 时将交配过 3 次的存活雄蛾（不超过 10 头）与相同数量的 1 日龄处女雌蛾放入交配笼（30 cm ×30 cm ×30 cm）中，从 19∶00 时开始，按照上述方法观察、移出交配雌雄蛾并记录交配时间。雌雄蛾饲养方法同 1.1 节。1，2，3 和 4 次配对分别重复 17，9，5 和 3 次。

1.5　不同交配次数二化螟雄蛾精巢体积比较

中午 13∶00 时，解剖 1.4 节中得到的交配 1，2 和 3 次的 5 日龄雄蛾精巢，比较不同交配次数雄蛾的精巢体积大小，具体解剖方法如下：将蛾体背面向上，从基部取下腹部，放入 75% 酒精中，利用镊子从腹基部开始，小心地将腹部各节的背板和腹板去掉，完整地暴露出整个生殖系统，找到精巢，去掉精巢表面的脂肪体，得到完好精巢。摆好精巢姿势，利用 Motic 显微镜 SMZ-168 和照相系统 Moticam2506（麦克奥迪，厦门）在 1 × 物镜和 20 × 放大倍数条件下拍照。由于二化螟精巢为近圆球体，我们利用软件 Motic Plus Images 2.0 分别测量了精巢赤道半径 a，b（沿着 x 和 y 轴）和极半径 c 的长度，按照椭球体积公式 $V = 4\pi abc/3$ 计算二化螟精巢体积。各日龄分别解剖雄蛾 10 头。

1.6　与不同交配次数二化螟雄蛾交配雌蛾的交配囊及精包大小比较

上午 9∶00 时，解剖 1.4 节中与不同交配次数二化螟雄蛾进行交配的雌蛾，得到交配囊，在 1 × 物镜和 10 × 放大倍数条件下拍照。之后再解剖精包，同样方法拍照。选择形状为近椭圆体的交配囊和精包，按照 1.5 节中方法计算交配囊和精包体积。比较与不同交配次数二化螟雄蛾交配雌蛾的交配囊及精包大小。与不同交配次数二化螟雄蛾交配的交配囊和精包数量分别各测量 9 ~ 14 个。

1.7　与不同交配次数二化螟雄蛾交配雌蛾的产卵量比较

将 1.4 节中与不同交配次数二化螟雄蛾进行交配的雌蛾放入产卵杯中，每日 18∶00 时检查雌蛾产卵情况，记录产卵量，直至雌蛾死亡，计算雌蛾总产卵量。雌蛾饲养方法同 1.1 节。与不同交配次数二化螟雄蛾交配的雌蛾各 16 头。

1.8　数据分析

数据分析采用软件 SPSS 17.0。多组平均数间的方差分析采用 One-way ANOVA 法，显著性分析采用 LSD（least significant difference）法，两组平均数间的显著性分析采用 Student 氏 t 检验法。利用双变量相关性分析中的 Pearson 相关系数进行相关性分

析，相关性分析的显著性用双尾 t 检验分析。回归分析采用线性回归法。显著性分析时 $P>0.05$ 表示差异不显著，$P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果

2.1 雌雄蛾按 1∶1配对时的交配次数

从交配次数分布比例来看，将雌雄蛾按 1∶1配对，雄蛾可以交配 0～3 次（图 1：A），其中交配 0－3 次雄蛾的比例分别为 26.0% ±2.4%，38.0% ±2.0%，20.0% ±4.5% 和 16.0% ±2.4%（图 1：A），雄蛾的交配率为 74.0% ±2.4%，多次交配雄蛾（交配次数≥2）的比例为 36.0% ±2.2%。显著性分析表明，交配 1 次的雄蛾比例显著高于交配 0，2 和 3 次的（$P\leq0.005$），交配 0 次的雄蛾比例显著高于交配 3 次的（$P=0.02$）。交配雄蛾平均交配 1.7 ± 0.1 次。

从某一交配频次雄蛾进行下一次交配的比例统计来看，1∶1配对雄蛾中有 74.0% ±2.4% 会进行交配（图 1：B）；在交配 1 次的雄蛾中，有 48.6% ±2.7% 会进行第 2 次交配；在交配 2 次的雄蛾中，有 46.7% ±9.4% 会进行第 3 次交配。雄蛾进行第 1 次交配的比例显著高于交配第 2 和 3 次的（$P\leq0.041$）（图 1：B）。

从交配雄蛾的日龄分布来看，0－5 日龄雄蛾分别交配了 14，21，13，8，5 和 2 头，其中 1 日龄和 2 日龄交配雄蛾中分别有 16 和 7 头雄蛾为首次交配，从 3 日龄雄蛾开始，新交配数量极少；有 5，4 和 1 头雄蛾分别在 0－1 日龄、1－2 日龄和 4－5 日龄连续交配，有 1 头雄蛾在 0－2 日龄连续交配；在进行多次交配的 18 头雄蛾中，分别有 8，8 和 2 头雄蛾分别在 0－2 日龄首次交配，表明多次交配雄蛾绝大部分来自于 0－1 日龄交配雄蛾（表 1）。

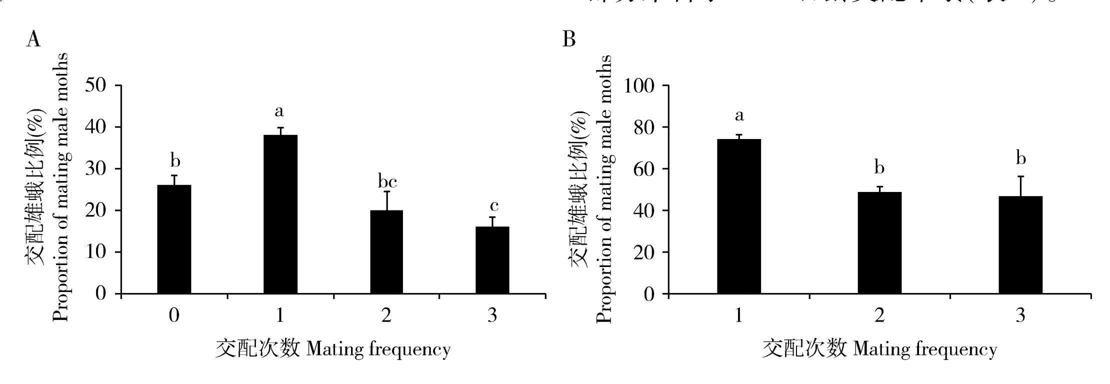


图 1 雌雄按 1∶1配对时二化螟雄蛾的交配次数

Fig. 1 Mating frequency of male moths of *Chilo suppressalis* when paired in the ratio of 1 female to 1 male

A：不同交配次数雄蛾的比例 Proportion of male moths with different mating frequencies；B：某个交配次数雄蛾中进行下一次交配的比例 Proportion of male moths taking the next mating at a certain mating frequency. 柱上不同字母表示不同交配次数雄蛾的交配比例差异显著（LSD 法，$P<0.05$）。Different letters above bars indicate significant differences in the proportion of mating male moths among different mating frequencies by LSD method ($P<0.05$). 图 2 和 3 同 The same for Figs. 2 and 3.

表 1 二化螟雄蛾的交配动态

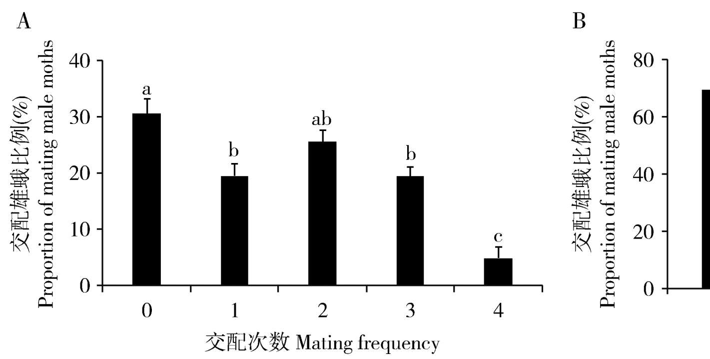
Table 1 Mating dynamics of male moths of *Chilo suppressalis*

交配次数 Mating frequency	交配雄蛾日龄 Day-old age of mating male moths	交配雄蛾数量 Number of mating male moths
0		13
1	2 日龄 2-day-old	5
1	1 日龄 1-day-old	8
1	0 日龄 0-day-old	6
2	2 日龄 2-day-old, 4 日龄 4-day-old	2
2	1 日龄 1-day-old, 2 日龄 2-day-old	3
2	1 日龄 1-day-old, 3 日龄 3-day-old	4
2	0 日龄 0-day-old, 1 日龄 1-day-old	1
3	1 日龄 1-day-old, 4 日龄 4-day-old, 5 日龄 5-day-old	1
3	0 日龄 0-day-old, 2 日龄 2-day-old, 4 日龄 4-day-old	1
3	0 日龄 0-day-old, 2 日龄 2-day-old, 5 日龄 5-day-old	1
3	0 日龄 0-day-old, 3 日龄 3-day-old, 4 日龄 4-day-old	1
3	0 日龄 0-day-old, 1 日龄 1-day-old, 2 日龄 2-day-old	1
3	0 日龄 0-day-old, 1 日龄 1-day-old, 3 日龄 3-day-old	3

2.2　二化螟雌雄蛾按 4∶1配对时的交配次数

从交配次数分布比例来看，雌雄蛾按 4∶1配对，雄蛾可以交配 0～4 次（n＝80），其中交配 0－4 次的雄蛾比例分别为 30.6% ±2.6%，19.5% ±2.1%，25.6% ±2.1%，19.4% ±1.6% 和 4.9% ±2%（图 2：A），雄蛾的交配率为 69.4% ±2.6%，多次交配雄蛾的比例为 51.3% ±2.3%。雌雄蛾按 4∶1配对时，交配雄蛾的平均交配次数为 2.1 ±0.1 次，显著高于雌雄蛾按 1∶1配对时雄蛾的平均交配次数（*P*＝0.02）。显著性分析表明，交配 0 次的雄蛾比例显著高于交配 1 次和 3 次的（*P*≤0.016），再显著高于交配 4 次的（*P*≤0.002）（图 2：A）。

从某一交配频次雄蛾进行下一次交配的比例统计来看，雌雄蛾按 4∶1配对，雄蛾中有 69.4% ±2.6% 会进行交配（图 2：B）；在交配 1 次的雄蛾中，有 72.0% ±2.4% 会进行第 2 次交配；在交配 2 次的雄蛾中，有 48.9% ±3.2% 会进行第 3 次交配；在交配 3 次的雄蛾中，有 19.2% ±8.2% 会进行第 4 次交配。雄蛾进行第 3 次交配的比例显著低于交配第 1 和 2 次的（*P*≤0.003），进行第 4 次交配的雄蛾比例显著低于交配第 3 次的（*P*＝0.015）（图 2：B）。在交配 1 次的雄蛾中，雌雄蛾按 4∶1配对时，进行第 2 次交配的雄蛾比例显著高于雌雄蛾按 1∶1配对时的雄蛾比例（*P*＜0.001）。



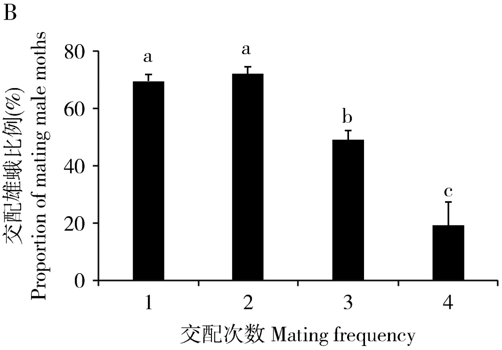


图 2　雌雄按 4∶1配对时二化螟雄蛾的交配次数

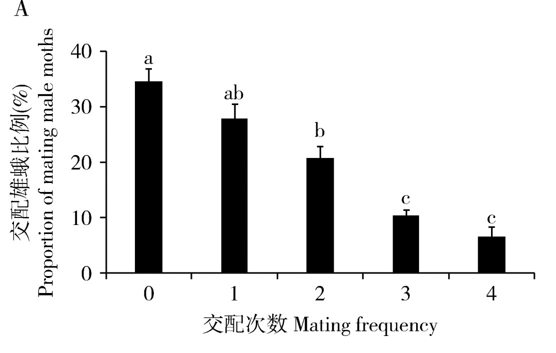
Fig. 2　Mating frequency of male moths of *Chilo suppressalis* when paired in the ratio of 4 females to 1 male

A：不同交配次数雄蛾的比例 Proportion of male moths with different mating frequencies；B：某个交配次数雄蛾中进行下一次交配的比例 Proportion of male moths taking the next mating at a certain mating frequency.

2.3　二化螟雌雄蛾按 10∶10 配对时的交配次数

从交配次数分布比例来看，雌雄蛾按照 10∶10 配对时，雄蛾可以交配 0～4 次，其中交配 0－4 次的雄蛾比例分别为 34.5% ±2.4%，27.8% ±2.7%，20.7% ±2.1%，10.4% ±1% 和 6.7% ±1.6%（图 3：A）。交配雄蛾平均交配 1.9 ±0.1 次。显著性分析表明，交配 0 次的雄蛾比例显著高于交配 2 次的（*P*＝0.001），再显著高于交配 3 和 4 次的（*P*≤0.002）（图 3：A）。

从某一交配频次雄蛾进行下一次交配的比例统



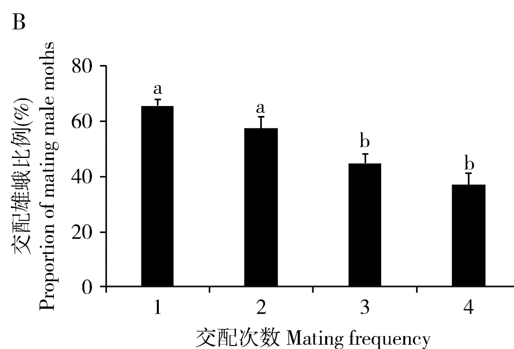


图 3　雌雄按 10∶10 配对时二化螟雄蛾的交配次数

Fig. 3　Mating frequency of male moths of *Chilo suppressalis* when paired in the ratio of 10 females to 10 males

A：不同交配次数雄蛾的比例 Proportion of male moths with different mating frequencies；B：某个交配次数雄蛾中进行下一次交配的比例 Proportion of male moths taking the next mating at a certain mating frequency.

计来看，雌雄蛾按 10∶10 配对，雄蛾中有 65.5% ± 2.4% 会进行交配；在交配 1 次的雄蛾中，有 57.3% ± 4.3% 会进行第 2 次交配；在交配 2 次的雄蛾中，有 44.8% ±3.3% 会进行第 3 次交配；在交配 3 次雄蛾中，有 36.9% ±4.2% 会进行第 4 次交配。雄蛾进行第 1 和 2 次交配的比例显著高于交配第 3 和 4 次的($P\leqslant0.040$)。多次交配雄蛾的比例为 37.8% ± 2.5%（图 3：B）。

2.4 不同交配次数雄蛾的交配持续时间比较

从交配持续时间来看，第 1, 2 和 3 次交配的持续时间分别为 106.1 ±3.9, 98.8 ±3.6 和 145.4 ± 9.3 min，其中第 3 次交配的持续时间显著长于第 1 和 2 次交配($P<0.001$)，第 1 和 2 次交配的持续时间无显著差异($P=0.173$)（图 4）。

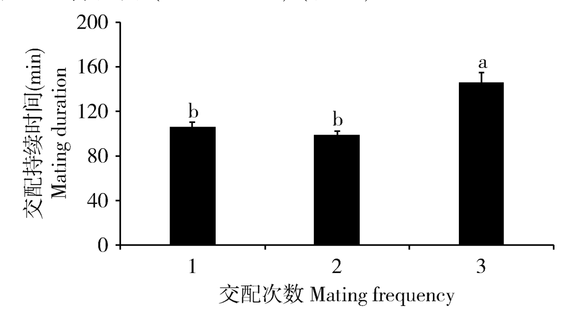


图 4 不同交配次数二化螟雄蛾的交配持续时间

Fig. 4 Mating duration of male moths of *Chilo suppressalis* with different mating frequencies

柱上不同字母表示差异显著（LSD 法，$P<0.05$）。Different letters above bars indicate significant differences by LSD method ($P<0.05$). 图 5 和 7 同 The same for Figs. 5 and 7.

2.5 不同交配次数雄蛾精巢大小比较

从雄蛾精巢大小来看，交配 1, 2 和 3 次雄蛾的精巢体积分别为 0.187 ±0.022, 0.193 ±0.021 和 0.187 ± 0.026 mm^3（图 5），显著性分析表明交配 1 -3次雄蛾的精巢体积之间差异不显著($P\geqslant0.857$)。

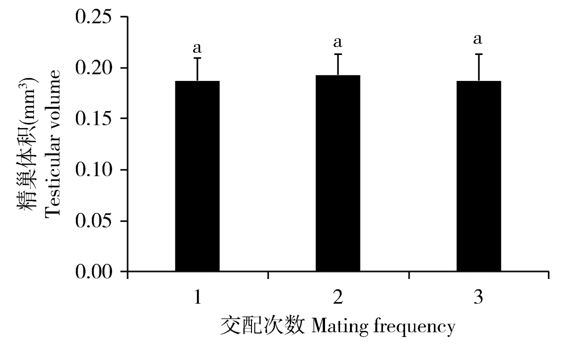


图 5 不同交配次数二化螟雄蛾的精巢体积

Fig. 5 The testicular volume of male moths of *Chilo suppressalis* with different mating frequencies

2.6 与不同交配次数雄蛾交配雌蛾的交配囊和精包比较

从雌蛾交配囊形状来看，新交配二化螟雌蛾的交配囊表现出不同形状，包括肾形、椭圆形和倒锥形（图 6：A, B）。二化螟的交配囊为膜质，撕开交配囊后，发现其内含有的精包形状和交配囊形状相似（图 6：D, E），表明交配后雌蛾交配囊的形状主要由其内部的精包形状决定。从雌蛾交配囊体积来看，与第 1 和 2 次交配雄蛾进行交配雌蛾的交配囊体积分别为 16.6 ±1.0 和 20.3 ±2.5 mm^3（图 6：C），其内含的精包体积分别为 12.8 ±2.0 和 13.6 ± 1.7 mm^3（图 6：F）。与第 1 和 2 次交配雄蛾进行交配雌蛾的交配囊和精包体积均差异不显著($P\geqslant0.198$)。

2.7 与不同交配次数雄蛾交配雌蛾的产卵量比较

从雌蛾产卵量来看，与第 1, 2 和 3 次交配雄蛾进行交配的雌蛾的产卵量分别为 77.9 ±16.5, 79.7 ± 18.2 和 77.5 ±18.7 枚，各产卵量之间几乎无差异($P\geqslant0.936$)（图 7）。

3 讨论

3.1 二化螟雌雄蛾交配的选择性导致部分雄蛾在交配前死亡

在 3 种雌雄配对方式中，分别有 26.0%, 30.6% 和 34.5% 的雄蛾在交配之前即死亡。雄蛾在交配前死亡的情况在焦晓国等(2006)的研究中也有发现。表明并不是所有雄蛾均能够进行交配。事实上，二化螟雌蛾的交配率也不会达到 100%。王银淑(1989)从室内大量二化螟交配雌蛾中随机选择 50 头进行解剖，连续解剖 3 代，发现交配 0 次的比例为 36.5%。焦晓国等(2006)用 25 头雌蛾进行交配实验时，有 2 头在交配前死亡。我们还发现，雌雄蛾按 4∶1配对时的雄蛾交配次数显著高于按 1∶1配对时($P=0.02$)，这是由于在交配 1 次雄蛾中，按 4∶1配对时雄蛾进行第 2 次交配的比例显著高于按 1∶1配对时($P<0.001$)。上述结果均表明二化螟雌雄蛾在交配时会对交配对象进行选择。同一日龄雄蛾中，已交配雄蛾的精巢体积显著大于未交配雄蛾（冯波等，2019），说明二化螟雌蛾会选择精巢体积更大的雄蛾进行交配，交配是雌雄双方选择的结果，交配选择可能是为了使种群具有更强的竞争能力。但是雌雄蛾以 10∶10 配对时雄蛾的平均交配次数与雌雄蛾以 1∶1和 4∶1配对时雄蛾的平均交配次数均

图 6　刚完成交配二化螟雌蛾的交配囊（A – C）和精包（D – F）

Fig. 6　The bursa copulatrix (A – C) and spermatophore (D – F) of the newly mated female moths of *Chilo suppressalis*

A, B：刚完成交配雌蛾中不同形状的交配囊 Bursa copulatrix of the newly mated female；C：与不同交配次数雄蛾完成交配后雌蛾的交配囊体积 Volume of bursa copulatrix of the female moths mated with male moths at different mating frequencies；D – E：刚完成交配雌蛾交配囊中不同形状的精包 Spermatophore in the bursa copulatrix of the newly mated female；F：与不同交配次数雄蛾完成交配后雌蛾交配囊中的精包体积 Volume of spermatophore in the bursa copulatrix of the female moths mated with male moths at different mating frequencies. ns：无显著差异（Student 氏 *t* 检验，$P>0.05$）No significant difference (Student's *t*-test, $P>0.05$).

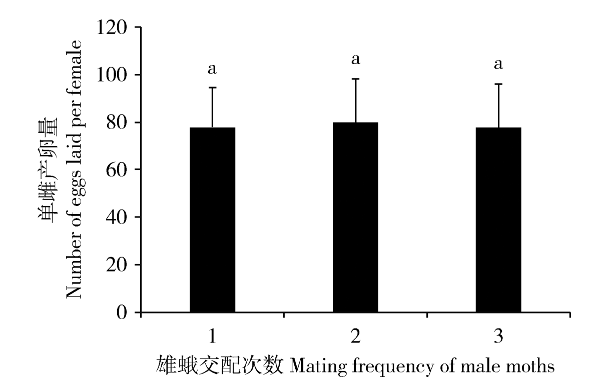


图 7　二化螟雄蛾交配次数对雌蛾产卵量的影响

Fig. 7　Effect of mating frequency of male moths of *Chilo suppressalis* on the number of eggs laid by female

无显著差异（$P\geqslant0.152$）（图 1 ~ 3）。同时通过调整光周期使茭白二化螟和水稻二化螟的交配时间重叠，水稻二化螟雌（雄）蛾并不会明显选择水稻二化螟雄（雌）蛾进行交配（Quan *et al*., 2017）。

3.2　具有多次交配能力的 0 – 1 日龄强壮雄蛾在首次交配前被合成性信息素诱捕

合成性信息素引诱的田间二化螟雄蛾精巢小于 0 – 1 日龄未交配雄蛾，大于 2 – 6 日龄未交配雄蛾（冯波等，2019），同时性诱雄蛾附腺端部内含物等级显著高于 2 – 6 日龄未交配雄蛾，第 3 和 4 段非角质化区内含物等级仅显著低于刚羽化（0 日龄）雄蛾（郭前爽等，2019）。考虑到性信息素引诱雄蛾的解剖时间延后了 12 h，推测田间性信息素引诱雄蛾中大部分是 0 – 1 日龄。室内试验还证实，被性信息素诱捕雄蛾的精巢体积显著大于未被性信息素诱捕雄蛾（冯波等，2019）。本研究发现二化螟雄蛾的首次交配主要发生在 0 – 1 日龄，从 3 日龄开始，雄蛾进行首次交配的比例极低，同时能够连续 2 晚进行交配的雄蛾比例较低，0 – 1 日龄交配雄蛾中的绝大部分为首次交配（表 1）。这和雄蛾生殖系统的解剖结果相似，交配后 24 h，已交配雄蛾生殖器内含物等级虽然和未交配雄蛾无显著差异，但是直到交配后 36 h，二化螟雄蛾生殖器内含物等级才恢复到未交配状态（郭前爽等，2019）。因此田间性诱剂引诱的绝大部分雄蛾应该为未交配的 0 – 1 日龄蛾。本研究还发现，在进行多次交配雄蛾中，0 和 1 日龄首次交配

雄蛾的比例分别为44.4%，表明被性信息素引诱的田间二化螟雄蛾中很多个体都具有多次交配能力，未被性信息素引诱雄蛾中很少个体能够进行多次交配。这主要是由于雄蛾精巢体积随日龄的增加而变小，已交配雄蛾的精巢体积显著大于未交配雄蛾，交配并不影响雄蛾精巢的发育（冯波等，2019），因此0和1日龄首次交配雄蛾的精巢很大，大于其余日龄首次交配雄蛾，从而保证了这些雄蛾进行多次交配的能力。精巢体积大小和交配次数的正相关性在其他多种昆虫中得到证实，例如精巢大的雄蝶可能具有更多的交配次数（Gage，1994），交配1次的四纹豆象 *Callosobruchus maculatus* 种群比多次交配种群的精巢体积更小（Gay *et al*.，2009）。我们利用3种配对方式（雌雄蛾按1∶1，4∶1和10∶10配对）对二化螟雄蛾的交配次数进行了详细研究，发现二化螟雄蛾确实可以进行多次交配，但是能够进行多次交配的雄蛾比例并不太高，分别为36.0%，51.3%和37.8%（图1－3）。

3.3 性信息素群集诱杀防控二化螟的有效性

二化螟雄蛾先于雌蛾羽化，因为雄蛾的发育历期为38.8 d，雌蛾的发育历期为40.6 d（肖丹凤和胡阳，2010）。雄蛾羽化后即可交配，羽化当晚的交配率为27.9%±2.7%，1日龄雄蛾的交配率达66.7%±5.3%（冯波等，2019），可以在交配窗口期利用性诱剂将先羽化的雄蛾诱杀。性信息素能够诱捕大量具有多次交配能力的0－1日龄强壮雄蛾，并且这种诱捕是在其与雌蛾进行首次交配前完成。将这部分雄蛾诱杀后，虽然田间还有一定数量的雄蛾，但是这些剩余雄蛾中有很多不会进行交配；即使进行交配，它们也仅能进行1次交配，很难进行多次交配，因此性信息素群集诱杀能够急剧降低田间雌蛾的交配率。虽然大部分二化螟雌蛾一生只交配1次，但是仍然有部分雌蛾可以交配2次或更多次（熊兴占等，1984；孙丽娟等，2002），这也会在一定程度上降低了田间交配雌蛾的数量。由于性信息素将精巢体积更大的雄蛾诱杀，田间剩余雄蛾的精巢较小，产生的精子数量较少，交配成功后雌蛾产下的受精卵的数量也较少。因此正确使用性诱剂可以大量诱杀交配能力强的二化螟雄性个体，降低田间雄蛾数量，极大地降低田间雄蛾的交配能力和雌蛾的交配率和产卵量，有效压低田间二化螟种群数量，取得很好的性诱防控效果。但是二化螟群集诱杀的防控效果极大地取决于性诱剂的引诱效果。如果性诱剂的引诱力不强，不能与田间雌蛾形成有效竞争，例如早期的橡皮头诱芯；性诱捕器的诱杀效率不高，例如水盆诱捕器，则性诱剂诱杀的雄蛾数量少，很多可能是已经交配过的雄蛾（Hu *et al*.，2018），性诱防效可能就较差甚至没有。

3.4 二化螟雄蛾的交配次数对雌蛾产卵量无显著影响

虽然雄蛾进行第3次交配的持续时间显著长于第1和2次交配，但是交配1－3次雄蛾的精巢体积之间差异不显著；与第1和2交配雄蛾进行交配后，雌蛾交配囊和内含的精包体积均差异不显著；和第1，2和3次交配雄蛾进行交配后，雌蛾的产卵量之间几乎无差异（图4～7），这些结果表明雄蛾的交配次数对与之交配雌蛾的繁殖力没有显著影响。熊兴占等（1984）也发现与第1－4次交配雄蛾交配雌蛾的产卵量和卵孵化率之间无明显差异。焦晓国等（2006）认为雄蛾不同交配史对雌蛾产卵期、产卵量、卵孵化率和寿命等生物学指标没有显著不良影响。另外，焦晓国等（2006）还认为雄蛾交配日龄对雌蛾生殖力、寿命、产卵量、产卵期等都没有显著影响。

本研究中未交配雄蛾的比例高于熊兴占等（1984）和焦晓国等（2006），而平均交配次数低于熊兴占等（1984）和焦晓国等（2006）。造成这种差异的原因可能包含如下两方面：一方面是本研究使用的雄蛾数量较大，约为300头，而熊兴占等（1984）和焦晓国等（2006）等使用的雄蛾数量较小，仅10～25头；另一方面是实验方法存在差异。实验方法差异具体分为以下几点：（1）本研究虫源来自浙江金华，熊兴占等（1984）的虫源来自重庆，焦晓国等（2006）的虫源未知。（2）熊兴占等（1984）在实验中放入了秧苗，本研究为了便于观察和抓捕交配中的二化螟，在实验过程中并未放入秧苗。有研究证实寄主植物可以促进二化螟成虫的交配（Samudra *et al*.，2002）。（3）温度、湿度、光周期等实验条件存在差异。焦晓国等（2006）的实验条件为温度25℃和光周期16L∶8D，熊兴占等（1984）在温度25℃和90%相对湿度条件下实验，本研究则为温度22±2℃，相对湿度70%±5%，光周期13L∶11D。研究表明温度、湿度、光周期等均会影响二化螟的交配行为（Kanno and Sato，1979；Kanno，1981b，1981c，1984）。事实上，研究结果出现差异在二化螟中是一个普遍现象，例如Konno和Tanaka（1996）认为水稻二化螟的交配行为发生在黑暗第2－5小时，但是Samudra等（2002）却认为水稻二化螟雌蛾几乎在整

个黑暗期(黑暗第 2 – 9 小时)都有求偶行为,这其中一个原因可能与季节有关。同一研究者在不同时间发表结果也差异很大,例如 Konno 和 Tanaka (1996)认为水稻二化螟和茭白二化螟 1 日龄蛾的交配率分别为56.7%和65.2%,但是 Kanno (1998)后来认为水稻二化螟和茭白二化螟 1 日龄蛾的交配率分别为 80% 和 20%。因此我们并不能将不同的研究结果进行简单比较。

参考文献 (References)

Cuong NL, Cohen MB, 2003. Mating and dispersal behaviour of *Scirpophaga incertulas* and *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae) in relation to resistance management for rice transformed with *Bacillus thuringiensis* toxin genes. *Int. J. Pest Manag.*, 49 (4): 275 – 279.

Du YJ, Guo R, Han QR, 2013. The application of insect sex pheromone to control the rice stem borer and the rice leaf roller. *China Plant Prot.*, 33(11): 40 – 42, 39. [杜永均, 郭荣, 韩清瑞, 2013. 利用昆虫性信息素防治水稻二化螟和稻纵卷叶螟应用技术. 中国植保导刊, 33(11): 40 – 42, 39]

Feng B, Guo QS, Yao XM, Li D, Cheng JJ, Chen QH, Du YJ, 2019. Association between the mating activity and testicular volume of male moths of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomol. Sin.*, 62(7): 849 – 856. [冯波, 郭前爽, 姚晓明, 李迪, 程建军, 陈庆华, 杜永均, 2019. 二化螟雄蛾交配行为与精巢大小的关系. 昆虫学报, 62(7): 849 – 856]

Gage MJG, 1994. Associations between body size, mating pattern, testis size and sperm lengths across butterflies. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 258(1353): 247 – 254.

Gay L, Hosken DJ, Vasudev R, Tregenza T, Eady PE, 2009. Sperm competition and maternal effects differentially influence testis and sperm size in *Callosobruchus maculatus*. *J. Evol. Biol.*, 22(5): 1143 – 1150.

Guo QS, Wang CR, Song XD, Feng B, Chen QH, Du YJ, 2019. Effects of age and mating status on the characteristics of internal genital organs of male adults of the striped rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Acta Entomol. Sin.*, 62 (7): 838 – 848. [郭前爽, 王春荣, 宋显东, 冯波, 陈庆华, 杜永均, 2019. 日龄和交配状态对二化螟雄蛾内生殖器特征的影响. 昆虫学报, 62(7): 838 – 848]

Hu Y, Dai C, He J, Zhu J, Zheng Y, Fu Q, 2018. A technique for determining the mating status of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) males. *J. Entomol. Sci.*, 53(1): 11 – 16.

Huang C, Hu B, Li J, Wang Y, 2016. Water-oats harbors two strains of the striped stem borer *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) with temporal divergence in mating behavior. *Appl. Entomol. Zool.*, 51(3): 457 – 463.

Ishiguro N, Yoshida K, Tsuchida K, 2006. Genetic differences between rice and water-oat feeders in the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Crambidae). *Appl. Entomol. Zool.*, 41 (4): 585 – 593.

Jiao XG, Xuan WJ, Sheng CF, 2005. Mass trapping of the overwintering generation stripped stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) with the synthetic sex pheromone in northeastern China. *Acta Entomol. Sin.*, 48(3): 370 – 374.

Jiao XG, Xuan WJ, Sheng CF, 2006. Mating behavior of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker). *Acta Ecol. Sin.*, 26(4): 1110 – 1115. [焦晓国, 宣维健, 盛承发, 2006. 水稻二化螟的交配行为. 生态学报, 26(4): 1110 – 1115]

Kanno H, 1981a. Mating behaviour of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). V. Critical illumination intensity for female calling and male sexual response under various temperatures. *Appl. Entomol. Zool.*, 16(3): 179 – 185.

Kanno H, 1981b. Mating behaviour of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). VI. Effects of photoperiod on the diel rhythms of mating behaviours. *Appl. Entomol. Zool.*, 16(4): 406 – 411.

Kanno H, 1981c. Seasonal variation in periodicity of mating behaviour in the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae). *Bull. Entomol. Res.*, 71(4): 631 – 637.

Kanno H, 1984. Mating behaviour of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae). VII. Circadian rhythm of mating behaviour. *Appl. Entomol. Zool.*, 19(2): 263 – 265.

Kanno H, Sato A, 1978. Mating behavior of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). I. Effects of moth age on mating activity. *Appl. Entomol. Zool.*, 13(3): 215 – 221.

Kanno H, Sato A, 1979. Mating behaviour of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). II. Effects of temperature and relative humidity on mating activity. *Appl. Entomol. Zool.*, 14(4): 419 – 427.

Kanno Y, 1998. Mating-choice and host preference tests in the rice-feeding and water-oat-feeding types of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan*, 49: 102 – 104.

Konno Y, Tanaka F, 1996. Mating time of the rice-feeding and water-oat-feeding strains of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.*, 40(3): 245 – 247.

Lei YY, Wei CX, He YR, Lan HX, Wen LK, Hu YH, Yang DZ, 2009. Utilization of sweet corn grain in mass-rearing experimental populations of the striped stem borer, *Chilo suppressalis*. *Chin. Bull. Entomol.*, 46(5): 795 – 798. [雷妍圆, 韦秉兴, 何余容, 蓝海讯, 温丽葵, 胡艳红, 杨东制, 2009. 用甜玉米粒饲养二化螟实验种群. 昆虫知识, 46(5): 795 – 798]

Quan WL, Liu W, Zhou RQ, Chen R, Ma WH, Lei CL, Wang XP, 2017. Difference in diel mating time contributes to assortative mating between host plant-associated populations of *Chilo suppressalis*. *Sci. Rep.*, 7: 45265.

Samudra M, Emura K, Hoshizaki S, Ishikawa Y, Tatsuki S, 2002.

Temporal differences in mating behavior between rice- and water-oats-populations of the striped stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Crambidae). *Appl. Entomol. Zool.*, 37 (2): 257 -262.

Sheng CF, Yang FA, Wei YB, Zhu CQ, Xiong YW, 2000. Field tests of the effects of the mass trapping with synthetic sex pheromone on rice stem borer, *Chilo suppresalis* (Walker). *Plant Prot.*, 26(5): 4 -5. [盛承发, 杨辅安, 韦永保, 祝春强, 熊延文, 2000. 性诱剂诱杀二化螟的田间效果试验. 植物保护, 26(5): 4 -5]

Su JW, Xuan WJ, Sheng CF, Ge F, 2003. The sex pheromone of rice stem borer, *Chilo suppressalis* in paddy fields: suppressing effect of mass trapping with synthetic sex pheromone. *Chin. J. Rice Sci.*, 17 (2): 171 -174. [苏建伟, 宣维健, 盛承发, 戈峰, 2003. 水稻二化螟性信息素技术: 大量诱捕二化螟的防治效果研究. 中国水稻科学, 17(2): 171 -174]

Sun LJ, Dai HG, Yi WX, Lu YQ, 2002. The adult emergence rhythm and mating rhythm of rice host population and water-oats host population of the rice stem borer. *Entomol. Knowl.*, 39(6): 421 -423. [孙丽娟, 戴华国, 衣维贤, 陆永钦, 2002. 二化螟水稻类群与茭白类群成虫羽化节律和交配节律研究. 昆虫知识, 39 (6): 421 -423]

Ueno H, Furukawa S, Tsuchida K, 2006. Difference in the time of mating activity between host-associated populations of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker). *Entomol. Sci.*, 9(3): 255 -259.

Wang YS, 1989. Observation on mating behavior of *Chilo suppressalis*. *Entomol. Knowl.*, 26(4): 201 -202. [王银淑, 1989. 二化螟交配行为的观察. 昆虫知识, 26(4): 201 -202]

Xiao DF, Hu Y, 2010. A preliminary research on protandry in rice striped stem borer. *Chin. Bull. Entomol.*, 47(4): 736 -739. [肖丹凤, 胡阳, 2010. 二化螟成虫雄性先羽化现象. 昆虫知识, 47 (4): 736 -739]

Xiong XZ, Sun Y, Hu CF, 1984. Study on copulation habit of *Chilo suppressalis* Walker and usage of sex hormone to control the pest. *J. Southwest Agric. Univ.*, 1(4): 42 -49. [熊兴占, 孙英, 胡崇富, 1984. 水稻二化螟的交配习性与性诱治螟的研究. 西南农学院学报, 1(4): 42 -49]

Yu Q, Yan Q, Dong SL, 2017. Effect of temperature on the sex pheromone communication of *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 28(11): 3784 -3788. [余棋, 闫祺, 董双林, 2017. 温度对二化螟性信息素通讯的影响. 应用生态学报, 28(11): 3784 -3788]

Zuo W, Gong ZJ, Zhu ZR, Du YJ, Chen C, Cheng JA, 2008. An efficiency comparison of several trapping equipments baited with sex pheromone for capturing male moths of rice striped stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker). *J. Nucl. Agr. Sci.*, 22 (2): 238 -241. [左文, 巩中军, 祝增荣, 杜永均, 陈灿, 程家安, 2008. 水稻二化螟性信息素和诱捕器组合的田间诱蛾效果比较. 核农学报, 22(2): 238 -241]

(责任编辑: 赵利辉)